

10Gbit/s APD-ROSAの開発

中村 智広

烏野 ゆたか

光通信の高速化・大容量化を背景に10Gbit/s光伝送システムの普及が目覚ましい。なかでも、MAN（メトロポリタンエリアネットワーク）や高速LAN（ローカルエリアネットワーク）を構築する小型トランシーバXFP（10Gbit/s small Form-factor Pluggable）は急速に需要が拡大しており、これに内蔵されるROSA（Receiver Optical Sub Assembly）と呼ばれる小型光受信モジュールは送信側のTOSA（Transmitter Optical Sub Assembly）と併せてキーデバイスとなっている。

昨今、市場においては短距離から伝送距離40kmまで対応可能なフォトダイオード（PIN-PD）を使用したPIN-ROSAの浸透や、より高感度が要求される伝送距離80kmを超える中・長距離に対応可能なアバランシェフォトダイオード（Avalanche Photo Diode：APD）を使用したAPD-ROSAの製品化が進んでいる。APD-ROSAは大容量伝送が可能な波長多重（Wavelength Division Multiplex: WDM）方式のシステム、より長距離伝送を可能とする電子分散補償（EDC）を用いたシステムへの適用も検討されている。

本稿では、上記の市場要求を背景に自社開発したAPD素子とプリアンプICを内蔵したXMD-MSA（10Gbit/s Miniature Device Multi Source Agreement）準拠のAPD-ROSAを紹介する。

APD素子構造と素子設計

最初に、ROSA用に新規に開発したAPD素子について説明する。前述した市場背景から、以下の2点を主要な開発目標として表1に示すAPD素子の目標仕様を定めた。

- ① APD-ROSA最小受信感度 < -27.5dBm
- ② 波長1550nmに対するL-band（1610nm）での相対感度劣化量 < 1dB

図1にAPD素子の断面図を示す。目標とする電気光学特性が実現でき、ROSA構造に適している、InP基板側を光の入射面とする裏面入射構造を採用した。本構造では、p電極による光学反射の効果により、吸収されなかった透過光が再度吸収されるため、光吸収層の薄膜化が可能と

表1 目標仕様

項目	条件	目標仕様
受光感度	増倍率 $M=1$	$>0.9A/W$
暗電流	$0.9 \times VBR$	$<20nA$
帯域幅	増倍率 $M=3 \sim 9$	$>8GHz$
素子容量	$0.9 \times VBR$	$<200fF$
L-bandでの相対感度劣化量	$\Delta = 1610nm$	$<1dB$

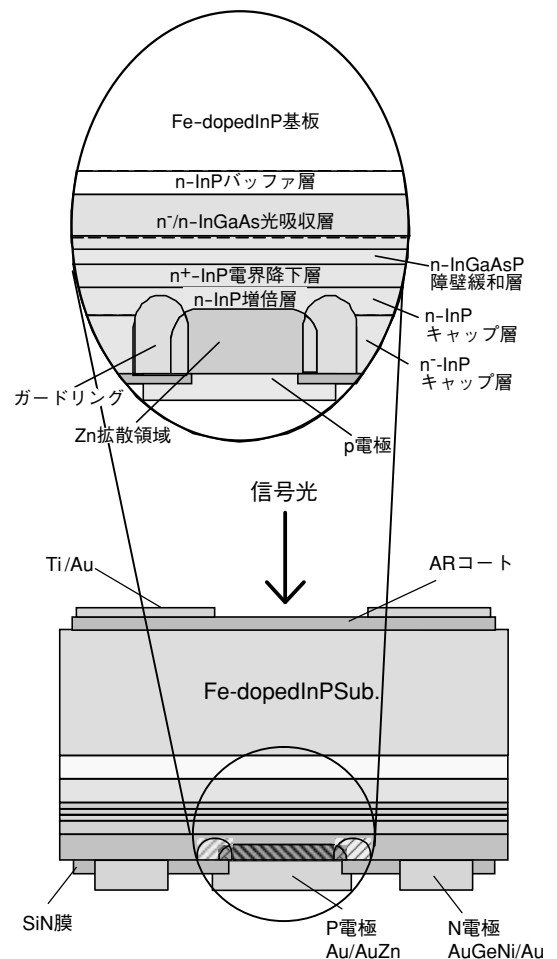


図1 裏面入射型APD素子の断面図

なり、高い光-電気変換効率と高速動作を同時に満足させることができる^{1) 2) 3)}。また、表面入射構造の場合に生じるパッド電極下の寄生容量がなく、その分受光径を大口径化できるため、光学調芯時のトレランスを広げることができる。APD素子の外形寸法は幅350μm×奥行350μm×高さ100μm、受光径はφ35μmに設計した。

APD素子は、図1に示した向きで、アルミナ製のサブキャリア上にフリップチップ実装され、チップオンキャリア（APD-COC）の状態でROSAパッケージ内に実装される。このため、表面に形成される電極は、微小な接合面積で、十分な接合強度と信頼性が確保できる構造が必要となる。接合強度の増加と寿命特性劣化の原因となるInP層へのAu拡散防止のため、Ti/Pt/Auを2重積層する電極構造を採用し、さらに、接合部のストレスを緩和するため、その厚みの最適化等も施した。一方、信号光が入射される裏面には光学反射低減のため、反射率1%以下のAR膜を形成した。さらにROSA組立て時の調芯効率化や迷光対策として、Ti/Au遮光膜を用いた円形入射窓を形成した。

次に、APD素子の受光部の層構造について説明する。InP基板上にn-InPバッファ層、n⁻/n⁺-InGaAs光吸収層、InGaAsP障壁緩和層、n⁺-InP電界降下層、n⁻-InPキャップ層の順に結晶成長した構造である。高感度特性を得るため、InP基板には光透過率の高い半絶縁性のFeドープの基板を採用した³⁾。L-band帯相対感度劣化を最小限に抑えるため、InGaAs層を最適な組成比に設計した。また、広い光入力ダイナミックレンジを得るには、最小受信感度に影響する高増倍時のみならず、低増倍時においても広帯域特性を実現することが重要となる。高増倍時については、増倍立ち上がり時間低減のため、InP増倍層の厚みと電界強度を最適化した。一方、低増倍時については、InGaAs光吸収層の一部のキャリア濃度を高くし、InGaAsP障壁緩和層の価電子帯側バンド構造の平坦化を図り、ヘテロ界面でのホールパイルアップを防止した。

APD素子特性

作製したAPD素子のI-V特性を図2に示す。増倍率M=1での受光感度は、0.9A/Wが得られている。また、暗電流は5nAと十分に小さい値が得られた。

図3には、波長1550nmを基準として正規化した、増倍率M=1およびM=10における受光感度の波長依存性を示す。L-Bandにおける相対感度劣化の増倍率依存性が抑えられ、増倍率M=10、波長1610nmにおける相対感度劣化量は1dB以内と良好であった。

次に、3dB帯域幅の増倍率依存性を図4に示す。最大帯

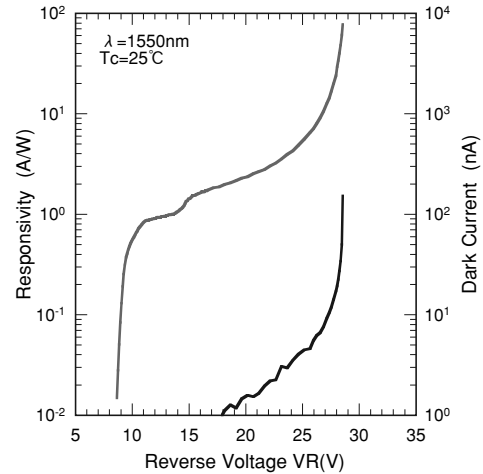


図2 APD素子の電流電圧特性

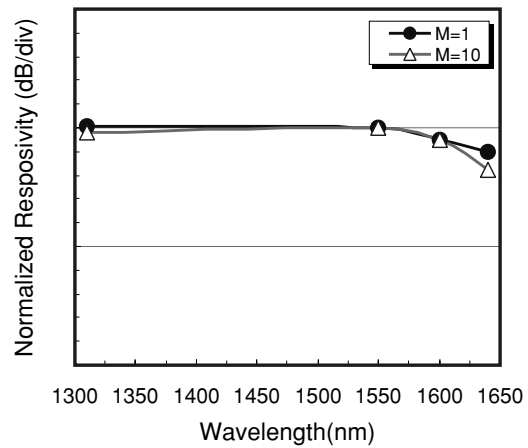


図3 受光感度の波長依存性

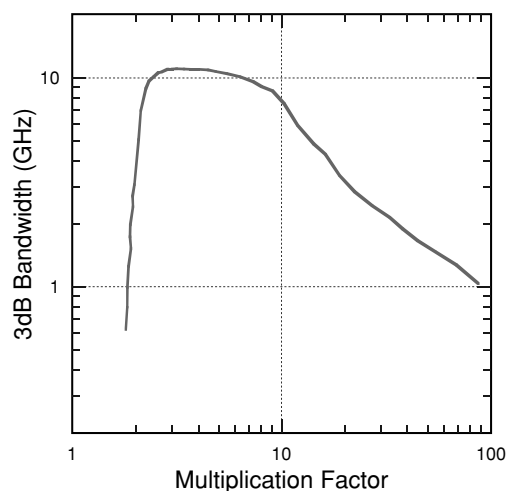


図4 3dB帯域の増倍率依存性

域幅は11GHzで、増倍率 $M=3\sim 9$ の範囲で8GHz以上、増倍率 $M=10$ において7.5GHzと良好な特性が得られた。GB積（増倍率-帯域幅積）は90GHzであった。

以上述べたように、今回開発したAPD素子の特性は、開発目標値として定めた目標仕様をほぼ満足することができた。加えて、L-Bandにおける相対感度劣化を低く抑えることができたため、WDM方式用のROSAとしても波長依存性の小さい良好な特性が期待できる。

APD素子信頼性試験

開発したAPD素子の信頼性について説明する。寿命特性を評価するための高温バイアス試験、および主としてフリップチップ接合部の信頼性評価を目的とした環境負荷試験を実施した。図5は雰囲気温度175℃、逆方向負荷電流100 μ Aでの高温通電試験における暗電流の経時変化を示す。試験サンプルには、事前に初期故障モードをスクリーニングするためのバーンイン試験を実施した。4000時間経過後においても、暗電流の増加が無く、良好な結果が得られた。この結果から、実使用温度（40℃）における偶発故障モードの平均故障率（Fit）は、活性化エネルギー0.35eVを用いた場合で100Fit以下となり、十分な寿命特性を有しているものである。また、振動衝撃試験、温度サイクル試験、高温・低温動作試験等の環境負荷試験を実施し、フリップチップ接合部の断線やAPD素子特性劣化は観察されず、APD-COCとして実使用条件に耐える信頼性が確保できていることを確認した。

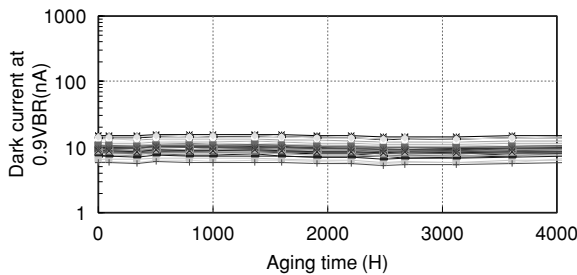


図5 高温通電試験における暗電流の経時変化

APD-ROSA構造

今回開発したAPD-ROSAは、外形や電気接続部仕様を共通化したXMD-MSA規格に準拠したものであり、写真1に外観写真を示す。今回開発した裏面入射型APD素子とGaAsプリアンプICをTO-46ステムに実装し、球レンズ付きキャップで気密封止したTO-CANにレセプタクル部品、フレキシブル基板（Flexible Printed Circuit: FPC）

を取り付けたものである。レセプタクル部品はTO-CANに光学調芯した状態でYAG溶接により一体固定する設計であり、簡単で信頼性の高い構造である。FPCは信号出力の取出しと電源供給するものであり、信号出力の伝播損失を最小限に抑え、安定した高周波信号出力を得よう設計し、小型トランシーバ内への実装や回路基板との接続において、部品配置のフレキシビリティが取れるよう設計した。



写真1 APD-ROSA外観

APD-ROSA特性

(1) 周波数特性

図6 (a) は小信号周波数応答特性（S21）を示すが、最適増倍率 $M=9$ における3dB帯域幅として7.5GHzが得られた。図6 (b) は、電気的反射特性を示すものであり、S21の3dB帯域内において、電気的反射特性13dB以下が得られていることがわかる。図6 (c) は群遅延特性を示しており、S21の3dB帯域内で、50ps以下の良好な特性が得られている。

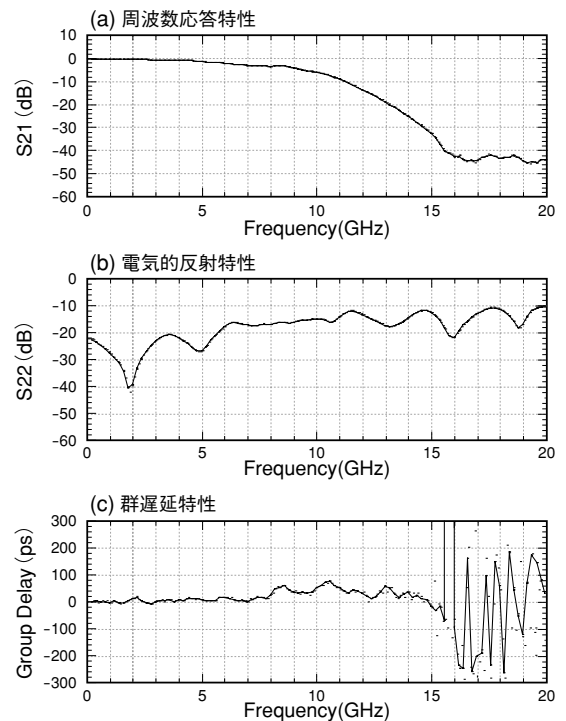


図6 周波数特性

(2) 受信感度特性

図7に符号誤り率 (Bit Error Rate : BER) の受信感度依存性を示す。最小受信感度は25℃において-28dBmと高感度な受信性能が得られている。最大受信感度としては-3dBm以上の値であり、25dB以上の広いダイナミックレンジを得ることができた。

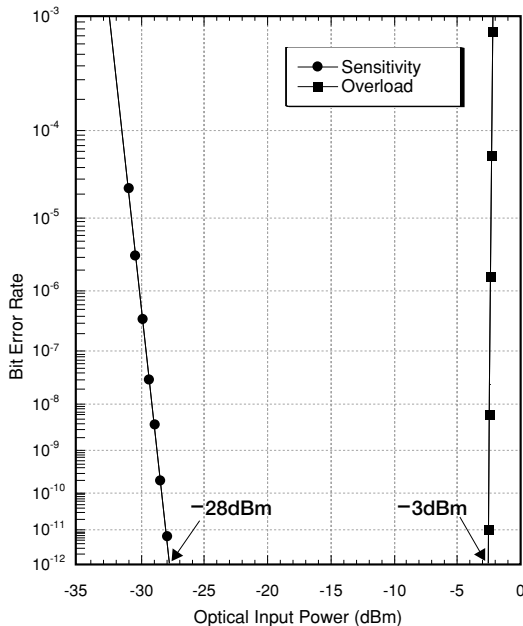


図7 BERの受信感度依存性

(3) OSNR耐力

WDM方式を用いるアプリケーションでは伝送路中に光増幅器としてエルビウムドープファイバ増幅器 (Erbium Doped Fiber Amplifier : EDFA) が用いられるため、APD-ROSAにはASE (Amplified Spontaneous Emission) ノイズ成分が負荷された信号光が入射される。このため、WDM方式では、信号光にASEノイズ成分を負荷した場合の光信号対雑音比 (Optical Signal-to-Noise Ratio : OSNR) に対する符号誤り率特性が重要であり、評価した。

図8には、各光受信感度におけるBERのOSNR依存性を示す。-22dBm~-5dBmの広い光受信範囲で、1e-12以下の符号誤り率が得られるOSNRは19dBであり、良好なOSNR耐性を示していることがわかる。

まとめ

10Gbit/s小型トランスポンダである中・長距離伝送用XFP用受信モジュールとして、XMD-MSA準拠のAPD-ROSAを開発した。裏面入射型APD素子を開発し、線形

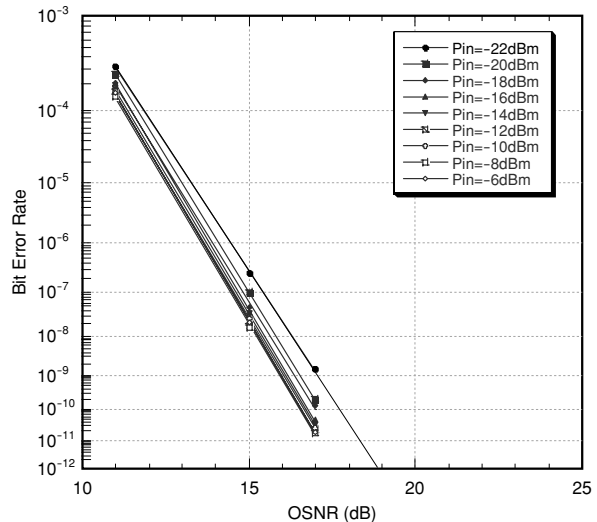


図8 OSNR耐力

性のよりプリアンプICを内蔵することで、最小受信感度-28dBm、ダイナミックレンジ25dB以上の良好な受信性能を得ることができた。良好なOSNR耐力があり、L-band波長帯域での相対感度劣化抑制できてきていることから、より大容量・長距離対応のWDM、EDCを用いたシステムへ適用できるものと考えられる。◆◆

参考文献

- 1) 加藤昌伸, 古川量三: “半導体受光素子及びその製造方法”, 特開2000-183390
- 2) 加藤昌伸, 古川量三, 寺嶋宗弘, 高野紘: “平面実装光モジュール用鏡面反射型フォトダイオード”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J83-C No.3, 2000年
- 3) 冨本忠利: “端面入射型PIN-PDを用いた10Gbit/s表面実装型モジュールの開発”, 沖テクニカルレビュー196号, Vol.70 No.4, pp.100-103, 2003年10月

筆者紹介

中村智広: Tomohiro Nakamura. オプティカルコンポーネントカンパニー 開発部 光通信第三チーム
 烏野ゆたか: Uno Yutaka. オプティカルコンポーネントカンパニー 開発部 光通信第三チーム